

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет електроніки
Кафедра електронних приладів та пристроїв

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри, проф., д.т.н.

_____ Л.Д. Писаренко
“ ____ ” _____ 2019 р.

ДИПЛОМНА РОБОТА

освітньо-кваліфікаційного рівня **«Бакалавр»**

з спеціальності **171- Електроніка**

на тему **«СЕНСОР НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР»**

Виконав:

Студент 4 курсу, гр.ДЕ-351 **Пасічник Олександр Миколайович** _____

Науковий керівник:

Професор, д.т.н., с.н.с.

Жовнір М.Ф. _____

Нормоконтроль:

Доцент, к.т.н.

Чадюк В.О. _____

Рецензент:

Доцент кафедри мікроелектроніки,
канд.техн. наук , доцент

Іващук А.В. _____

Засвідчую, що у цій бакалаврській
роботі немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань

Студент _____
(підпис)

Київ – 2019

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет

Е л е к т р о н і к и

Кафедра

Е л е к т р о н н і п р и л а д и т а п р и с т р о ї

Рівень вищої освіти

перший (бакалаврський) за освітньо-науковою програмою

Спеціальність

171– Електроніка (Електронні прилади та пристрої)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри, проф., д.т.н.

_____ Л.Д. Писаренко
«___»_____ 2019 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Пасічник Олександр Миколайович

1. Тема роботи: СЕНСОР НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР

керівник роботи Жовнір Микола Федорович, професор, д.т.н., с.н.с.

затверджений наказом по університету від 27. 05.2019 р. № 1406-С

2. Термін подання студентом роботи «___»_____ 2019 р.

3. Вихідні дані до роботи: Чутливі елементи на базі терморезисторів для вимірювання криогенних температур в діапазонах: 1,8...200 К; 10...30 К; 60...100 К.

4. Зміст роботи: Анотація; вступ; огляд характеристик датчиків температури на базі терморезисторів та їх застосування для вимірювання криогенних температур; результати експериментальних досліджень датчиків температури на базі терморезисторів; висновки; список використаної науково-технічної літератури.

5. Перелік ілюстративного матеріалу: Складальне креслення датчиків температури; структурна схема установки для дослідження термометричних характеристик мікроелектронних датчиків температури; плакати з формулами та графіками.

6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд характеристик датчиків температури на базі терморезисторів	30.04.2019	
2	Особливості роботи терморезисторів у складі датчиків кріогенних температур	10.05.2019	
3	Методика дослідження характеристик датчиків кріогенних температур	20.05.2019	
4	Принципи лабораторних випробовувань датчиків кріогенних температур	31.05.2019	
5	Методика розрахунку роботоздатності та надійності конструкцій датчика температур	10.06.2019	
6	Оформлення пояснювальної записки, креслення, плакатів з формулами та результатами розрахунків, підготовка доповіді	15.06.2019	

Студент _____

О.М.Пасічник

Керівник роботи _____

М.Ф.Жовнір

Р Е Ф Е Р А Т

Сенсор низьких температур / Бакалаврська робота зі спеціальності **171– Електроніка** спеціалізації «Електронні прилади та пристрої».

Пасічник Олександр Миколайович . НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського». Факультет електроніки, кафедра електронних приладів та пристроїв. Група ДЕ-351. – К.: НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», 2019. – 61 с., іл.9, табл.-1.

Ключові слова: ТР-терморезистор; ТКО-температурний коефіцієнт опору; ТР-терморезистор; Т-температура; R_T – опір терморезистора при температурі Т.

Короткий зміст роботи:

Представлено конструкції та результати експериментального дослідження трьох типів мікроелектронних датчиків на базі терморезисторів для вимірювання температури в діапазонах 1,8 – 200 К, 10 – 30 К, 60 - 100 К.

Термочутливість термоперетворювача для діапазону 1,8 - 200 К при температурі рідкого гелію 4,2 К складає близько 2000 Ом на 1 К .

Термочутливість термоперетворювача для діапазону 10...30 К при температурі рідкого водню 20,4 К складає близько 2500 Ом на 1 К.

Термочутливість термоперетворювача для діапазону 60...100 К при температурі рідкого азоту 77,4 К складає близько 1000 Ом на 1 К .

А Н О Т А Ц І Я

Представлено конструкції та результати експериментального дослідження трьох типів мікроелектронних датчиків на базі терморезисторів для вимірювання температури в діапазонах 1,8 – 200 К, 10 – 30 К, 60 - 100 К.

Термочутливість термоперетворювача для діапазону 1,8 - 200 К при температурі рідкого гелію 4,2 К складає близько 2000 Ом на 1 К .

Термочутливість термоперетворювача для діапазону 10...30 К при температурі рідкого водню 20,4 К складає близько 2500 Ом на 1 К.

Термочутливість термоперетворювача для діапазону 60...100 К при температурі рідкого азоту 77,4 К складає близько 1000 Ом на 1 К .

Розроблені мікроелектронні датчики температури на терморезисторах можуть бути використані для розробки багатоканальних систем вимірювання кріогенних температур.

S U M M A R Y

Designs and results of an experimental research of three types of microelectronic gauges on base thermoresistors for measurement of temperature in ranges 1,8 - 200 K, 10-30 K, 60 - 100 K are submitted.

Thermal sensitivity of the thermal gauge for a range 1,8 - 200 K at temperature of liquid helium 4,2 K make about 2000 Ohm on 1 K.

Thermal sensitivity of the thermal gauge for a range 10...30 K at temperature of liquid hydrogen 20,4 K makes about 2500 Ohm on 1 K.

Thermal sensitivity of the thermal gauge for a range 60...100 K at temperature of liquid nitrogen 77,4 K makes about 1000 Ohm on 1 K.

The developed microelectronic gauges of temperature on thermoresistors can be used for development many channels systems of measurement of cryogenic temperatures.

№ з/п	Формат	Позначення			Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4				Завдання на дипломну роботу	2	
2	A4	ЗБР.171.051.007 ПЗ			Пояснювальна записка	55	
3	A3	ЗБР.171.051.007.04 ТП			Установка для градуювання термоперетворювачів <i>Схема функціональна пневматична</i>	1	
4	A3	ЗБР.171.051.007.01 СК1			Термоперетворювач-1 <i>Складальне креслення</i>	1	
5	A3	ЗБР.171.051.007.02 СК2			Термоперетворювач-2 <i>Складальне креслення</i>	1	
6	A3	ЗБР.171.051.007.03 СК3			Термоперетворювач-3 <i>Складальне креслення</i>	1	
7					Плакати з результатами випробування термоперетворювачів кріогенних температур	2	

З М І С Т

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	8
В С Т У П	9
1. Т Е О Р Е Т И Ч Н А Ч А С Т И Н А	12
1.1. Основні характеристики датчиків температури	12
1.2. Основні параметри терморезисторів	14
1.3. Температурна залежність опору	16
1.4. Статичні вольт-амперні характеристики	19
1.5. Основні принципи роботи терморезисторів у схемах	22
1.6. Вимірювання і регулювання температур	24
1.7. Низькотемпературні терморезистори	28
1.8. Основні типи германійових термометрів	29
В и с н о в к и	30
2. Е К С П Е Р И М Е Н Т А Л Ь Н А Ч А С Т И Н А	32
2.1. Методика вирощування (легування) германія	32
2.2. Дослідження термометричних характеристик термочутливих матеріалів	33
2.3. Технічні вимоги по розробці напівпровідникових кріогенних термометрів (термоперетворювачів)	39
2.3.1. Основні технічні характеристики термоперетворювачів	39
2.3.2. Опис вибраних конструкцій термоперетворювачів	39
2.3.3. Лабораторні випробовування термоперетворювачів	42
2.3.4. Розрахунки для підтвердження роботоздатності і надійності конструкцій	47
В и с н о в к и	52
В И С Н О В К И	53
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ....	56
ЗБР.171.051.007.01- Термоперетворювач-1. Складальне креслення.....	58
ЗБР.171.051.007.02- Термоперетворювач-2. Складальне креслення	59
ЗБР.171.051.007.03- Термоперетворювач-3. Складальне креслення	60
ЗБР.171.051.007.04- Установка для градування термоперетворювачів Схема функціональна пневматична	61

					ЗБР.171.051.007 ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.		Пасічник О.М.			Сенсор низьких температур		Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Жовнір М.Ф.						7	61
Реценз.				ФЕЛ, каф.ЕП та П, гр.ЕА-з51					
Н. Контр.		Чадюк В.О.							
Затверд.		ПисаренкоЛ.Д.							

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ТР - терморезистор;

ТКО - температурний коефіцієнт опору;

ТР - терморезистор;

Т - температура;

R_T - опір терморезистора при температурі Т.

					ЗБР.171.051.007 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Реалізація широкої автоматизації різноманітних процесів у промисловості, наукових дослідженнях, побуті значною мірою визначається можливостями пристроїв для одержання інформації про регульований параметр або процес. Цими пристроями є датчики, до яких відносяться всі основні вузли електронної схеми для вимірювання неелектричних величин, розташованих безпосередньо у зоні контролю.

Серед численних напівпровідникових приладів, використаних у цей час, перше місце належить напівпровідниковим термочутливим резисторам, які одержали назву терморезистор (ТР). У іноземній, а іноді й у вітчизняній літературі їх називають також термісторами (від англійської назви «thermally sensitive resistor»). Першими були розроблені ТР з від'ємним температурним коефіцієнтом опору (ТКО), які одержали найбільше поширення. В останні роки були створені ТР із додатнім ТКО.

Терморезистори — нелінійні напівпровідникові резистори, відмінною рисою яких є значна залежність величини їхнього електричного опору від температури. Терморезистори застосовуються для рішення величезного числа різноманітних завдань і стали одними з незамінних напівпровідникових приладів, що широко використовуються. Сучасні типи терморезисторів виготовляють з багатьох напівпровідникових матеріалів. Для цієї мети застосовуються леговані германій і кремній, карбід кремнію, напівпровідники із групи $A^{III}B^V$, напівпровідникове скло та інші матеріали.

Терморезистори – одні з найпростіших напівпровідникових приладів. Простота їхнього пристрою в сполученні з нелінійною різко вираженою залежністю величини опору від температури (при від'ємному або

					ЗБР.171.051.007 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

додатному значенні ТКО) привела до широкого використання ТР. В автоматичній й телемеханіці, термометрії, електроніці, електротехніці, електроприладобудівництві, телефонії й телеграфії терморезистори застосовуються для розв'язку всіляких технічних завдань. На основі ТР розроблені прості й надійні системи дистанційного й централізованого вимірювання й регулювання температур, протипожежної сигналізації й теплового контролю машин, механізмів і будь-яких інших об'єктів. Створено схеми температурної компенсації, ряду елементів електричного ланцюга, виміру потужності на НВЧ, вимірювання вакууму, швидкостей руху рідин і газів, теплопровідності газів і т. п. Терморезистори використовуються в якості дистанційних безконтактних змінних резисторів, обмежувачів і запобіжників у ланцюгах електричного струму, реле часу, стабілізаторів напруги, генераторів, модуляторів і підсилювачів порівняно низьких частот.

Уже одне перерахування основних областей, у яких застосовуються ТР, наочно свідчить про важливість цього елемента електричного ланцюга в сучасній техніці. Терморезистори завоювали широке визнання у зв'язку з такими перевагами, перед іншими приладами, придатними для аналогічних цілей, як високий рівень температурної чутливості, малі габарити а, отже, мала теплова інерція, гранична простота пристрою, стабільність характеристик у часі й майже повна відсутність необхідності спеціального догляду за ТР при їхній експлуатації.

Практичному застосуванню терморезисторів перешкоджав величезний розкид електричних параметрів зразків, виготовлених, здавалося б, тим самим способом. Величини опорів виробів змінювалися на кілька порядків залежно від домішок, режиму термообробки, способу нанесення контактів і т.п.

					ЗБР.171.051.007 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Хоча багато напівпровідників мають різко виражену температурну залежність питомого опору, далеко не кожний напівпровідниковий матеріал може бути практично використаний для виготовлення ТР у промислових масштабах. Знадобилося значне число наукових досліджень по з'ясуванню природи провідності, впливу домішок і термічної обробки на електропровідність напівпровідників для того, щоб розробити технологію виготовлення ТР, що задовольняють елементарним вимогам техніки.

У зв'язку з широким використанням низьких і наднизьких температур (кріогенних температур) в науці і техніці безперервно зростають вимоги і попит на прилади для вимірювання і контролю цих температур. В залежності від призначення до таких приладів пред'являються найрізноманітніші вимоги, такі як висока чутливість у заданому вузькому діапазоні температур чи на всьому низькотемпературному інтервалі, вібростійкість та ударостійкість, мініатюрність, мінімальна чутливість до магнітних та радіаційних полів та інші. Таке широке поле вимог активізує задачу подальших пошуків по створенню кріогенних термометрів різного призначення. Аналіз науково-технічної літератури дозволяє зробити висновок про те, що напівпровідникові термометри опору належать до найбільш перспективних, а серед них особливо виділяються германієві термометри завдяки цілому ряду вдало поєднаних технологічних, фізичних і метрологічних факторів.

Завданням бакалаврської роботи є дослідження, які направлені на обґрунтування створення напівпровідникових кріогенних датчиків на основі германію в діапазонах робочих температур: 1,8 – 200 К, 10 – 30 К, 60 - 100 К.

					ЗБР.171.051.007 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Основні характеристики датчиків температури

Основними характеристиками датчиків температури є:

1. Функція перетворення (градувальна характеристика) являє собою функціональну залежність її вихідної величини від вимірюваної величини:

$$y = f(x) \quad (1.1)$$

Залежність представляється в іменованих величинах: y – в одиницях вихідного сигналу або параметрах датчика, x – в одиницях вимірюваної величини.

2. Чутливість – відношення збільшення вихідної величини датчика до збільшення його вхідної величини:

$$S = dy/dx . \quad (1.2)$$

Для датчиків температури S визначається в Ом/°C або мВ/К.

Для лінійної частини функції перетворення чутливість датчика постійна. Чутливість датчика характеризує ступінь досконалості процесу перетворення в ньому вимірюваної величини.

3. Поріг чутливості – мінімальна зміна значення вхідної величини, яку можна впевнено виявити. Поріг чутливості зв'язаний як із природою самої вимірюваної величини, так і з досконалістю процесу перетворення вимірюваної величини в датчику.

4. Межа перетворення – максимальне значення вимірюваної величини, що може бути виміряне без зворотних змін у датчику в результаті робочих впливів. Верхня межа вимірів датчика звичайно менша межі перетворення, принаймні на 10%.

					ЗБР.171.051.007 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5.Метрологічні характеристики – визначаються конструктивно-технологічними особливостями датчика, стабільністю властивостей застосованих у ньому матеріалів, особливостями процесів взаємодії датчика з вимірюваним об'єктом. Метрологічні характеристики, у свою чергу, визначають характер і величини похибок виміру датчиків. Складові похибок можуть бути випадковими і вони враховуються методами математичної статистики. Систематичні похибки можуть бути аналітично описані й виключені з результатами виміру.

Основними видами систематичних похибок є:

1. Похибки, обумовлені нелінійністю функції перетворення, що характерно для напівпровідникових датчиків температури.

2. Похибки, обумовлені варіацією функції перетворення внаслідок зміни напрямку дії вхідної величини (для датчиків температури це нагрівання-охолодження).

3.Похибки, обумовлені невідповідністю динамічних можливостей датчика швидкості впливу вхідної величини. Може бути враховано введенням коефіцієнта термічної інерції.

4. Додаткові похибки, обумовлені відмінністю умов роботи датчика від тих, у яких визначалася його функція перетворення.

5. Похибки, обумовлені нестабільністю функції перетворення внаслідок процесів старіння матеріалу.

6. Надійність – розглядається у двох аспектах: механічна надійність і метрологічна надійність.

7.Експлуатаційні характеристики – до їхнього числа можуть бути віднесені: маса, габаритні розміри, споживана потужність, міцність електричної ізоляції, номінали використаних електричних напруг, а також стійкість до агресивних середовищ, усіляким випромінюванням і т.д.

					ЗБР.171.051.007 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2. Основні параметри терморезисторів

Як і будь-який технічний прилад, терморезистори мають ряд параметрів і характеристик, знання яких дозволяє з'ясувати можливість використання даного ТР для рішення певного технічного завдання.

До числа основних параметрів ТР із від'ємним ТКО відносяться наступні:

1. Габаритні розміри.

2. Величина опору R_t або R_T (в Ом або кОм) при певній температурі навколишнього середовища t , °С або T , К. Для ТР, розрахованих на робочі температури приблизно від —100 до 125—200 °С, температура t звичайно приймається рівної 20 або 25 °С і величина R_t називається «холодним опором». Терморезистори з максимальними робочими температурами до 300°С звичайно нормалізуються при 150 °С.

3. Величина температурного коефіцієнта опору α у відсотках на 1 °С. Звичайно вона вказується для тієї ж температури t , що й холодний опір, і в цьому випадку позначається через α_t . Часто приводяться так само величини постійних B в градусах, що визначають температурну чутливість ТР у всьому або в частині інтервалу його робочих температур.

4. Постійна часу τ у секундах, що характеризує теплову інерційність терморезистора. Вона дорівнює часу, протягом якого температура ТР змінюється на 63% від різниці температур зразка й навколишнього середовища. Найчастіше цю різницю беруть рівної 100 °С.

5. Максимально припустима температура $t_{\text{макс}}$, до якої характеристики ТР тривалий час залишаються стабільними.

6. Максимально припустима потужність розсіювання $P_{\text{макс}}$ у Вт або мВт, що не викликає зворотних змін характеристик ТР. Природньо, що

					ЗБР.171.051.007 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

при навантаженні ТР потужністю $P_{\text{макс}}$ його температура не повинна перевищувати $t_{\text{макс}}$.

7. Коефіцієнт розсіювання H [Вт/ $^{\circ}\text{C}$], чисельно дорівнює потужності, що розсіюється на ТР при різниці температур зразка й навколишнього середовища в 1°C .

8. Коефіцієнт енергетичної чутливості G у Вт/% R , чисельно дорівнює потужності, яку потрібно розсіяти на ТР для зменшення його опору на 1%.

Коефіцієнти розсіювання й енергетичної чутливості залежать від параметрів напівпровідникового матеріалу й від характеру теплообміну між зразком і навколишнім середовищем. Величини G , H і α зв'язані між собою співвідношенням [5]:

$$G = \frac{\Delta P \cdot R}{\Delta R \cdot 100} = \frac{\Delta P / \Delta T}{100 \Delta R / \Delta T \cdot R} = \frac{H}{100\alpha} \quad (1.3)$$

H і G звичайно вказуються для терморезисторів, що перебувають в оточенні спокійного повітря при 20 або 25°C .

9. Теплоємність C [Дж/ $^{\circ}\text{C}$] рівна кількості тепла (енергії), необхідного для підвищення температури ТР на 1°C .

Можна показати, що τ , H и C зв'язані між собою наступним співвідношенням [5]:

$$\tau = C/H \quad (1.4)$$

Для позисторів, крім ряду наведених вище параметрів, звичайно вказують ще зразкове розміщення інтервалу додатного ТКО, температурний інтервал і величину максимального ТКО, а також кратність зміни опору в області додатного температурного коефіцієнта опору.

					ЗБР.171.051.007 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.3 Температурна залежність опору

Температурна залежність опору є головною характеристикою ТР, яка у значній мірі визначає інші характеристики цих виробів. Природно, що вона аналогічна температурній залежності питомого опору напівпровідника, з якого виготовлений даний ТР.

Вимірювання показують, що температурна залежність опору більшості типів ТР із від'ємним ТКО і з достатньою для практики точністю у всьому або в частині робочого інтервалу температур апроксимується виразом [5] :

$$R_T = Ae^{\frac{B}{T}} \quad (1.5)$$

де R_T — величина опору ТР при температурі T , °К, постійна [5]

$$A = A_{yo} \frac{l}{S} \quad (1.6)$$

залежить від фізичних властивостей матеріалу й габаритів ТР (l — відстань між електродами і S — площа поперечного перерізу напівпровідникового елемента ТР у см²), постійна B залежить від фізичних властивостей матеріалу й може мати одне або два значення в інтервалі робочих температур.

Прологарифмуємо вираз (1.5):

$$\lg R_T = \lg A + \frac{B}{T} \lg e = \lg A + 0,4343 \frac{B}{T} \quad (1.7)$$

Співвідношення (1.7) у координатах \lg і $1/T$ представляє рівняння прямої лінії, що значно полегшує визначення інтервалу температур, у якому (1.5) з необхідною точністю апроксимує дійсну залежність $R_T(T)$. За

					ЗБР.171.051.007 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

результатами вимірів R_T і T будується графік залежності $\lg R_T = f(1/T)$. Якщо через отримані експериментальні точки можна провести пряму, то вважають, що в даному інтервалі температур справедливий вираз (1.5).

Для практичних розрахунків з формули (1.5) зручно виключити постійну A . Написавши (1.5) для двох температур T_2 і T_1 і поділивши один вираз на інший, отримаємо:

$$R_{T_2} = R_{T_1} \exp \left[\frac{B(T_1 - T_2)}{T_1 T_2} \right] \quad (1.8)$$

З формули (1.8) можна розрахувати величину опору ТР при будь-якій температурі T_2 , (в інтервалі робочих температур), знаючи значення постійної B та опір зразка при якійсь одній температурі T_1 .

Величина постійної B визначається експериментально вимірюванням опору ТР при двох температурах T_1 і T_2 . Логарифмуючи вираз (1.8), легко одержати:

$$B = \frac{2,303 \Delta \lg R}{\Delta(1/T)} \quad (1.9)$$

де позначено $\Delta \lg R = \lg R_{T_2} - \lg R_{T_1}$ й $\Delta(1/T) = 1/T_2 - 1/T_1$. Розмірність B – градуси Кельвіна або Цельсія.

Якщо визначити температурний коефіцієнт опору ТР α так, як це звичайно прийнято [5]:

$$\alpha_T = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT}, \quad (1.10)$$

то з (1.5) видно, що

$$\alpha_T = -B/T^2 \quad (1.11)$$

					ЗБР.171.051.007 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для позисторів температурні залежності опору, зняті в широких інтервалах температур, мають складний характер. При досить низьких і високих температурах опір зменшується при збільшенні температури за законом, близькому до експонентного. У проміжній області R різко зростає при підвищенні температури. Крутістю характеристики, а отже, і величиною ТКО, можна керувати в широких межах різними технологічними прийомами.

Для багатьох типів позисторів опір у досить великому інтервалі температур (у межах декількох десятків градусів Цельсія) змінюється строго за експонентним законом:

$$R_T = Ae^{\alpha t} \quad (1.12)$$

де A – постійна, α – ТКО при температурі t^0 С в асолютних одиницях. Якщо температурна характеристика позистора відхиляється від закону (1.12), його все ж таки можна використати для апроксимації характеристики у вузькому інтервалі температур (порядку 2...5 0 С).

Виходячи з виразу (1.12), формулу для ТКО позистора можна записати у вигляді:

$$\alpha = \frac{2,303 \Delta \lg R}{\Delta t} \cdot 100, \quad \%/^0\text{C} \quad (1.13)$$

Величини ТКО сильно залежать від ширини й положення на температурній шкалі інтервалу температур, у якому розраховується ТКО.

					ЗБР.171.051.007 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

1.4 Статичні вольт-амперні характеристики

Якщо до постійного омичного резистора прикласти деяку напругу, то по ньому йде струм, величина якого визначається законом Ома. Сила струму збільшується пропорційно різниці потенціалів на резисторі. Тому вольт-амперними характеристиками таких резисторів будуть прямі лінії, що проходять через початок координат, а резистори називаються лінійними.

Статичні вольт-амперні характеристики терморезисторів відрізняються від прямих ліній, тобто ТР є нелінійними резисторами.

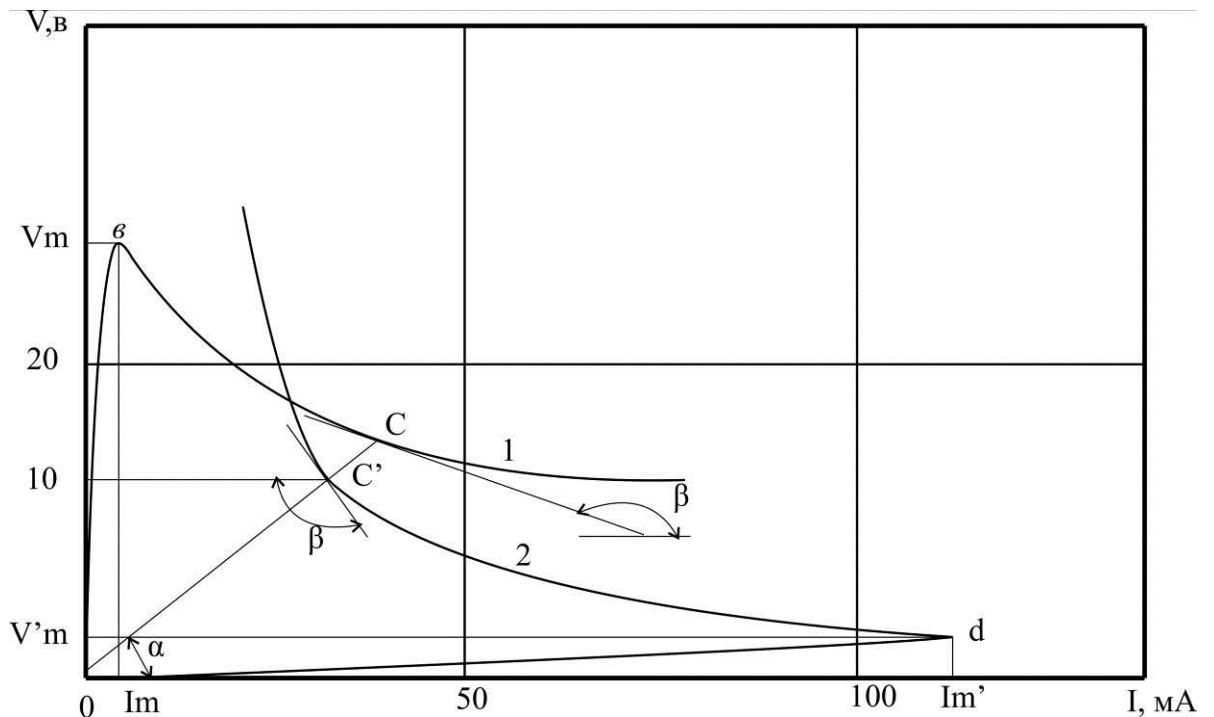


Рис. 1.1. Вольт-амперні характеристики ТР типу КМТ-1 (1) та позистора СТ5-1 (2)

Зазначені характеристики представляють залежність напруги на ТР від сили протікаючого по ньому струму в умовах теплової рівноваги між ТР і зовнішнім середовищем. Це означає, що кожного разу після зміни сили струму, внаслідок наявності в ТР певної теплової інерції, точки характеристики знімаються тільки після встановлення рівноваги між теплом, що виділяється струмом у зразку, і теплом, що віддається у навколишнє середовище.

Статичні вольт-амперні характеристики є одними з найважливіших характеристик ТР. На рис.1.1 представлені типові вольт-амперні характеристики ТР із від'ємним та додатнім ТКО (типу КМТ-1 і СТ5-1). Вид цих характеристик для звичайних ТР і позисторів різний, що й визначає особливості їх застосування в схемах. Це розходження підсилюється ще внаслідок того, що при розігріві позистора струмом через варисторний ефект стрибок опору в області **додатного** ТКО значно менше, ніж при нагріванні його за допомогою зміни температури навколишнього середовища. Для ТР із **від'ємним** ТКО залежність опору від температури й вольт-амперної характеристики добре узгоджуються між собою.

На початкових ділянках вольт-амперні характеристики є лінійними, тому що при досить малих струмах потужність, що розсіюється на ТР, занадто мала для того, щоб помітно нагріти їх, внаслідок чого виконується закон Ома. При збільшенні сили струму потужність що розсіюється зростає й ТР нагріваються вище температури навколишнього середовища. Опір ТР із **від'ємним** ТКО і крутість вольт-амперної характеристики зменшуються. При деякому значенні струму I_m напруга досягає максимального або пікового значення V_m . При подальшому зростанні струму напруга починає зменшуватися.

У позисторі на початковій ділянці характеристики Od (рис.1.1) опір також може трохи зменшуватися через наявність у ТР на цій ділянці невеликого негативного ТКО. В області сегнетоелектричного фазового переходу (починаючи від точки d) опір різко зростає й сила струму зменшується. При досить низьких температурах навколишнього середовища, коли позистори перебувають у сегнетоелектричній області й мають значний негативний ТКО, їх вольт-амперна характеристика складається із двох ділянок: перший типовий для ТР із негативним ТКО і другий – для позистора (рис.1.2).

					ЗБР.171.051.007 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

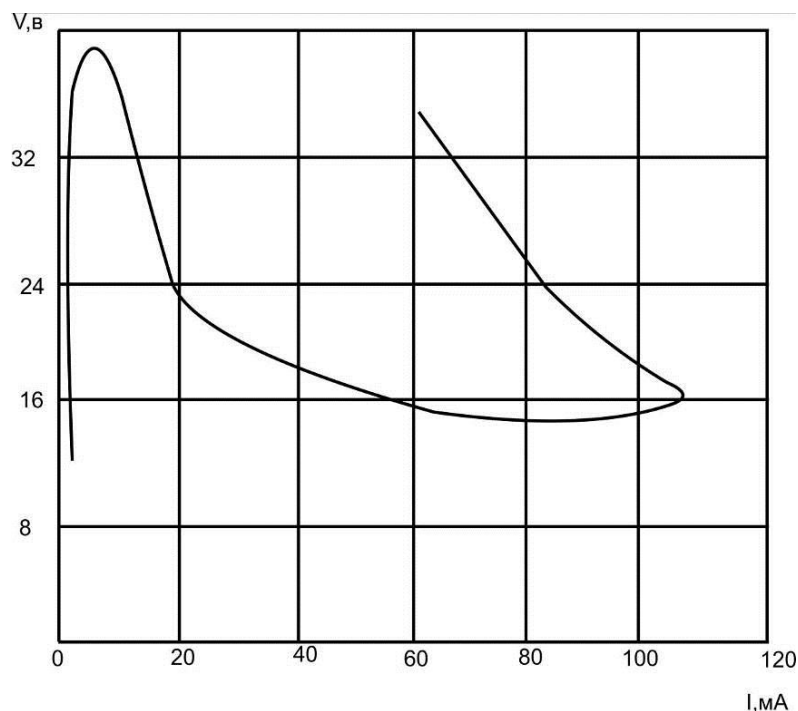


Рис.1.2. Вольт-амперна характеристика терморезистора типу СТ5-1

Якщо через будь-які крапки c або c' вольт-амперних характеристик (рис.1.1) провести дотичні до кривих і з'єднати ці точки з початком координат, то тангенс кута α дає величину так званого статичного опору ТР у точці c або c' , тобто:

$$R_{c(c')} = \operatorname{tg} \alpha = \frac{V_c}{I_c} = \frac{V_{c'}}{I_{c'}} \quad . \quad (1.14)$$

Тангенс кута β або β' визначає величину негативного диференціального опору $R'_{c(c')}$ в цих крапках:

$$R'_{c(c')} = \operatorname{tg} \beta(\beta') = \frac{dV}{dI} \quad . \quad (1.15)$$

На ділянках Ob або Od характеристик $dV/dI > 0$, тобто диференціальний опір ТР позитивний. У точці b (для звичайного ТР) $dV/dI < 0$, а в точці d (для позистора) $dV/dI = \infty$. На ділянках bc або dc' диференційний опір ТР обох видів стає негативним. Однак для звичайного ТР на цій ділянці в міру збільшення сили струму $dV/dI > 0$, у той час як у міру збільшення напруги на позисторі $dV/dI \rightarrow -\infty$. Ділянки негативного диференційного опору є робочими частинами вольт-амперних характеристик у багатьох випадках практичного використання ТР. При досить великій потужності, що розсіюється на позисторі, на вольт-

амперній характеристиці останнього може утворитися ділянка з падаючою характеристикою, як у звичайних ТР, тому що при досить високих температурах позистори мають негативний ТКС. Однак ця ділянка звичайно перебуває за межами робочої частини характеристики, і тому він не показаний на рис. 1.1.

1.5. Основні принципи роботи терморезисторів у схемах

Все широкі різноманіття відомих у цей час технічних застосувань ТР базується на чотирьох основних принципах роботи їх у схемах. Ці принципи логічно випливають із поділу областей використання ТР на групи, виходячи з величини електричного навантаження на напівпровідниковому елементі.

До першої групи відносяться області застосування ТР, при яких температура зразка t , отже, величина його опору змінюються внаслідок зміни температури або інших параметрів навколишнього середовища. Струм, який протікає через ТР настільки малий, що практично не розігріває його й служить лише для вимірювання величини опору. Це означає, що робочою ділянкою вольт-амперної характеристики ТР є її перша, лінійна ділянка, на якій з достатнім ступенем точності виконується закон Ома.

До цієї групи відносяться, наприклад, схеми вимірювання температур, температурної компенсації різних елементів електричного ланцюга, теплового захисту моторів за допомогою позисторів, вимірювання вологості повітря й ряд інших.

До другої групи належать області використання ТР, що відрізняються тим, що опір зразка змінюється внаслідок розігрівання його струмом. Коливання температури навколишнього середовища мають другорядне значення й часто є перешкодами. Робочою ділянкою вольт-амперної характеристики є та її ділянка, на якій диференціальний опір ТР є від'ємним. До цієї ж групи можна віднести ряд прикладів використання ТР, для яких важливі не тільки статичні, але й динамічні характеристики цих виробів, тобто характер зміни температури й опору зразку, напруги на ньому й сили

					ЗБР.171.051.007 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

струму в ланцюзі. До другої групи належить більшість відомих областей застосування ТР, наприклад, схеми вимірювання потужності на УВЧ, запобігання від перенапруг, використання ТР як перемикаючих пристроїв, генераторів низької частоти, мультівібраторів, пускових резисторів, реле часу, саморегулюючих мініатюрних термостатів і багато інших.

Третя група областей використання ТР поєднує ознаки першої й другої груп. У цьому випадку ТР може значно нагріватися струмом, але тепловий баланс зразка а, отже, величина його опору визначаються також і помітним впливом зовнішнього середовища. Наприклад, ступінь охолодження зразка, нагрітого струмом, може мінятися внаслідок зміни складу навколишньої рідини або газу. На цьому засновано застосування ТР як газоаналізатора. Залежність умов охолодження від щільності газового середовища, що оточує зразок, дозволяє використати ТР для вимірювання вакууму в схемі, що працює за принципом манометра Пірані. На зміні теплового балансу ТР при зміні температури навколишнього середовища заснована робота схем температурного контролю й пожежної сигналізації, що використовують виникнення релейного ефекту в ланцюзі при певній температурі і т. п.

Четверта група відрізняється тим, що терморезистор також нагріто значно вище температури навколишнього середовища. Однак у цьому випадку опір ТР визначається силою струму, що проходить по спеціальній підігрівній обмотці, електрично ізольованої від напівпровідникового тіла. До цієї групи відносяться області використання ТР спеціальної конструкції, а саме – ТР із непрямым підігрівом. Електричне навантаження на напівпровідниковому елементі звичайно настільки малі, практично не викликає його додаткового нагрівання.

ТР із непрямым підігрівом використовуються в тих випадках коли потрібно електрично розділити керуючі й керовані ланцюги, взаємодія між якими здійснюється за рахунок теплових процесів. Сюди відносяться змінні резистори без ковзного контакту з дистанційним керуванням, схеми із ТР для стабілізації амплітуди сигналу, для вимірювання швидкості плину рідини або газу й ряд інших.

					ЗБР.171.051.007 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.6 Вимірювання і регулювання температур

В наш час терморезистори найбільш широко використовуються для дистанційного й централізованого вимірювання й регулювання температур у різноманітних системах. Напівпровідникові термометри-опори мають ряд вагомих переваг у порівнянні з іншими видами температурних датчиків (наприклад, металевими термометрами-опорами, термопарами й т. п.). У першу чергу слід зазначити високу температурну чутливість ТР, температурний коефіцієнт опору яких для позисторів може досягати десятків % на 1°C , у той час як для таких металів, як мідь або платина, він становить усього близько $0,4\% /^{\circ}\text{C}$. Тому за допомогою ТР можна одержати високу точність вимірів при порівняно малій чутливості електровимірювальної апаратури.

Малі габарити ТР забезпечують порівняно невелику теплову інерцію температурного датчика й дозволяють вимірювати температури у важкодоступних місцях. Великі значення опору (які можуть становити десятки й сотні кОм) дозволяють повністю нехтувати опором проводів і перехідними контактними опорами. Стабільність сучасних промислових типів напівпровідникових термометрів-опорів наближається до стабільності металевих термометрів-опорів.

Найбільше поширення при технічних вимірюваннях температури за допомогою ТР одержала схема неврівноваженого моста Вітстона, зручна через високу чутливість, простоту при організації дистанційного вимірювання температур у багатьох пунктах, можливості порівняно легко здійснити безперервний запис температур за допомогою самописного гальванометра. Застосовується також схема врівноваженого моста Вітстона в тих випадках, коли ТР мають практично однакові ТКО. Методи розрахунку оптимальних значень параметрів мостових схем із ТР минулого розроблені М. А. Кагановим і Г.К. Нечаєвим.

					ЗБР.171.051.007 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При масовому виготовленні приладів, у яких датчиками є ТР, і при вимірах температури в багатьох пунктах серйозні ускладнення викликає розкид ТР по величинам їх електричних параметрів. Промисловість виготовляє ТР із від'ємним ТКО для вимірювання температур в основному з допуском по величині холодного опору в $\pm 20\%$ і по величині температурного коефіцієнта опору в $\pm 0,2\%$ на 1°C . Однак найчастіше залежність опору від температури різних зразків з однією й тією ж номінальною величиною опору не ідентичні. Тому важливого значення набуває уніфікація шкали приладів. Для цієї мети звичайно використовуються так звані контури взаємозамінності, що складаються із ТР, з'єднаного послідовно й паралельно з постійними резисторами.

Градуювання терморезисторів досить трудомістка операція, що доводиться проводити в спеціальних прецизійних термостатах. Як показали Б.Я. Горнштейн і Я.В. Павлоцький, завдання набагато спрощується, якщо точно відомий математичний закон, по якому змінюється опір ТР залежно від температури навколишнього середовища. Так наприклад, якщо для ТР із від'ємним ТКО досить точно виконується експонентний закон, то для будь-яких двох ТР дійсне співвідношення [5] :

$$\frac{\ln \frac{R'_{T_1}}{R'_{T_2}}}{\ln \frac{R''_{T_1}}{R''_{T_2}}} = \frac{B'}{B''} = n = \text{const} \quad (1.16)$$

де R_T — опір ТР при температурі T , B — постійна в температурній залежності опору. В (1.16) одним штрихом позначені всі величини, що відносяться до першого зразка, а двома — до другого. При порівнянні формул (1.11) і (1.16) також впливає [5]:

$$\frac{\alpha'}{\alpha''} = \frac{B'}{B''} = n = \text{const} \quad (1.17)$$

					ЗБР.171.051.007 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де α – ТКС терморезистора.

Таким чином, якщо відношення логарифмів опорів, виміряних при різних температурах у робочому діапазоні температур, залишається постійним, то для обох ТР експонентний закон (1.5) виконується досить точно. При цьому відпадає необхідність вимірювання температур. Важливо тільки забезпечити, щоб для обох ТР ці температури щораз були однаковими.

На підставі (1.5) за відомим значенням коефіцієнта n і значенням опорів обох ТР при якій-небудь одній температурі може бути визначене відношення опорів цих ТР при будь-якій іншій температурі в інтервалі, де справедливий закон (1.5). Ці дані корисні при налагодженні багатоточкових температурних датчиків на одне значення температури.

Звичайно температурні характеристики промислових зразків ТР трохи відрізняються від експоненти. У силу цього n не постійна, а є слабкою нелінійною функцією температури. На практиці рідко зустрічаються ТР, для яких експонентний закон виконувався б у широкому діапазоні робочих температур з похибкою менш 0.01 град. Завдання градуювання таких ТР ускладнюється. Часто їх температурну залежність апроксимують виразом [5] :

$$R_T = AT^\beta e^{B/T} \quad (1.18)$$

де β – постійна, близька до 1. У цьому випадку також можна перевірити виконання закону (1.7), не прибігаючи до вимірювання температури, шляхом вимірювання опору трьох зразків ТР при декількох температурах. Необхідно тільки забезпечити, щоб температури всіх зразків при кожному вимірюванні були б однакові. Справедливість сказаного впливає зі співвідношення, що виконується для цих зразків:

					ЗБР.171.051.007 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\frac{\ln\left(\frac{R'_{T_1}}{R'_{T_2}}\right) - \frac{\beta'}{\beta''} \ln\left(\frac{R''_{T_1}}{R''_{T_2}}\right)}{\ln\left(\frac{R'_{T_1}}{R'_{T_2}}\right) - \frac{\beta'}{\beta'''} \ln\left(\frac{R'''_{T_1}}{R'''_{T_2}}\right)} = \frac{B' - \frac{\beta'}{\beta''} B''}{B' - \frac{\beta'}{\beta'''} B'''} = N = const \quad (1.19)$$

Значення β'/β'' , β'/β''' і N можна знайти за допомогою (1.8), порівнююч показання трьох зразків ТР при будь-яких чотирьох значеннях температури, забезпечуючи щоразу рівність температур між всіма ТР.

Промисловістю виготовляють різні типи напівпровідникових термометрів-опору, призначених для вимірювання температур найрізноманітніших об'єктів, починаючи від великих приміщень і закінчуючи живими організмами.

Терморезистори, виготовлені у вигляді дуже тонких пластин (товщиною 10...20 мкм), використовуються як чутливі елементи напівпровідникових болометрів, призначених для реєстрації малих кількостей теплової енергії при вимірюванні температур вилучених, що рухаються, або занадто гарячих (для контактного вимірювання температури) предметів, для використання в інфрачервоній спектроскопії й у ряді інших випадків. Такий болометр часто міститься у фокусі параболічного дзеркала для фокусування на ньому більших кількостей енергії.

При виготовленні терморегуляторів з терморезисторами може бути використана схема моста Вітстона, в одне із плечей якого або у два протилежних плеча, як чутливі елементи включаються ТР. У вимірювальну діагональ розміщують поляризоване реле. При необхідності подальшого підвищення точності підтримування температури напруга з вимірювальної діагоналі моста надходить на вхід електронного підсилювача, на виході якого включене виконавче реле.

1.7. Низькотемпературні терморезистори

Особливі групи ТР із від'ємним ТКО, призначених для вимірювання й регулювання температур, становлять низькотемпературні терморезистори. Терморезистори, розраховані на кімнатні й більш високі температури, непридатні для виміру температур нижче $-100...-150^{\circ}\text{C}$. Для цієї мети повинні бути синтезовані матеріали зі значно більш низькими величинами питомого опору й постійної B . Так, наприклад, на думку Заксе, для роботи в інтервалі від температури кипіння рідкого кисню ($-183,3^{\circ}\text{C}$) до температури кипіння рідкого азоту ($-195,6^{\circ}\text{C}$) найбільш зручно використовувати матеріали з величинами B від 1000 до 1300 К. У цьому випадку величина ТКО при температурі кипіння рідкого кисню становить $-13,5...-17\text{ \%/}^{\circ}\text{C}$ і при температурі кипіння рідкого азоту $-18...-24\text{ \%/}^{\circ}\text{C}$. Для температур, близьких до температури кипіння рідкого водню (-252°C), найкраще підходять напівпровідники з $B \approx 200...250\text{ К}$ і для температур, близьких до температури кипіння рідкого гелію ($\sim -269^{\circ}\text{C}$) — з $B \approx 50^{\circ}\text{C}$.

Низькотемпературні ТР виготовляють як з оксидних напівпровідників, так і на основі легованих монокристалів германію. Оксидні ТР звичайно застосовуються при температурах не нижче 10°C . Вони вигідно відрізняються від германієвих терморезисторів незалежністю величини опору від магнітного поля, повної омичності контактів, меншим розкидом по величинам електричних параметрів і значно більш простій і стійкій технології виготовлення. Однак, судячи з літературних даних, вони уступають германієвим ТР і тим більше платиновим термометрам опору по стабільності. Особливо сильно на стабільність впливають різкі коливання температури датчика.

					ЗБР.171.051.007 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.8 Основні типи германієвих термометрів

Низькотемпературні германієві термометри застосовуються завдяки ряду переваг. До числа їхніх головних достоїнств належать більша чутливість і винятково висока тривала стабільність. Істотними недоліками цих термометрів є значний магніторезистивний ефект і відносно висока вартість.

Основним матеріалом для виготовлення чутливих елементів (ЧЕ) цих термометрів служить германій. Однак чистий германій (монокристалічний і полікристалічний) має в області низьких температур занадто великий питомий опір, тому він не використовується при виготовленні ЧЕ для такого температурного діапазону. Зменшити питомий опір можна, легуючи германій домішками, наприклад миш'яком, галієм або сурмою. Вміст зазначених домішок повинен становити приблизно від 10^{16} до 10^{18} ат/см³.

Електропровідність германія, легованого домішками, у температурному інтервалі від 1 до 100 К подвоюється. У діапазоні 10...100 К провідність визначається рухливими носіями заряду, що збуджуються термічно із домішкових рівнів, а в діапазоні приблизно 1...10 К здійснюється проходження електронів між атомами домішок. В обох випадках мова йде про домішкові провідності. В області температур вище приблизно 100 К провідність залежить в основному від теплового порушення вільних електронно-діркових пар. Але германієві термометри не застосовуються вище зазначеної температурної границі через малий температурний коефіцієнт опору.

					ЗБР.171.051.007 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В и с н о в к и

Огляд науково-технічної літератури показав, що в теперішній час зростає застосування низьких температур в ядерній фізиці та фізиці високих енергій, радіо-і НВЧ-техніці та медицині. Тому великого значення набувають чутливі вимірювальні прилади та інша апаратура з надпровідними елементами. Невід'ємною частиною техніки низьких температур є їх вимірювання.

Одночасно з розвитком низькотемпературної техніки та її застосуванням більшу роль набуває й техніка вимірювання низьких температур у межах приблизно від 1 до 273 К (від -272 до 0°C). Термометри для цих вимірів, як правило, засновані на температурній залежності обраних фізичних властивостей відповідних речовин. Такими властивостями можуть бути, наприклад, тиск газу, тиск парів у рівновазі з рідиною, об'єм рідини, електричний опір, термоелектрорушійна сила, магнітна проникність, швидкість звуку в газі й т.п.

При виборі термометра необхідно брати до уваги залежність термометричного параметра термометра (наприклад, опору, напруги й т.п.) від температури, теплоємності термометра (від якої залежить його постійна часу), нагрівання термометра за рахунок джоулівського тепла, чутливість до магнітного поля й геометричні розміри. Звичайно не можна не враховувати й складність термометра або методу, трудомісткість обслуговування, вартість і т.п. Зваживши, таким чином, переваги й недоліки можливих способів вимірювання низьких температур, можна дійти висновку, що в переважній більшості випадків найбільш раціональні електричні термометри й методи.

Електричні термометри, призначені для діапазону низьких температур, можна розділити на резистивні (термометри опору), ємнісні, індуктивні й

					ЗБР.171.051.007 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

термоелектричні. Із всіх відомих типів найбільше поширення одержали резистивні термометри й термоелектричні (термопари).

В свою чергу з термометрів опору найчастіше застосовуються платинові (зручні для низьких температур від 1К до 273 К), вугільні (від 0,02 до 100 К), термисторні (від 4 до 273 К), германієві (від 0,05 до 100 К), кремнієві (від 1 до 400 К) і з арсеніду галію (від 1 до 273 К). Серед термоелектричних у першу чергу потрібно зазначити термопари мідь/константан (від 10 до 273 К) і золото-залізо/хромель (від 1 до 273 К).

					ЗБР.171.051.007 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

2.1. Методика вирощування (легування) германія

Проведені дослідження показали, що багатоконпонентне легування германію домішками з різною енергією іонізації надає можливість керувати залежністю опору від температури практично у всьому інтервалі кріогенних температур. Аналіз методик легування показав, що найефективнішими методами введення домішок у германій для кріотермометрії є зонна перекристалізація з дифузією домішок в розчин із газової фази, а також ядерне легування (трансмутаційні реакції в германії). Перевагами методу зонної перекристалізації є його технологічність і відносна простота введення одночасно кількох легуючих домішок у різних пропорціях з метою одержання термочутливого матеріалу для наперед заданого діапазону кріогенних температур. Крім того метод зонної перекристалізації надає можливість легувати германій легколетучими домішками. Щоб попередити випаровування легколетучих компонентів із розплавленої зони, необхідно створити над поверхнею розплаву достатній тиск насичених парів цих компонентів, рівний пружності їх парів над розплавом. Для створення такого рівноважного тиску необхідно наявність двох температурних зон. В установці об'ємного легування режими температурних зон забезпечував блок нагрівачів. Крім них основними складовими установки являються блоки живлення та регулювання температури зон і системи механічних приводів.

Блок нагрівачів складається із спеціального кронштейна, на якому закріплені два секційних основних нагрівачі, а між ними в окремому корпусі розташований зонний нагрівач. Вибір температур фонових і зонного нагрівачів робиться виходячи із характеру фазової рівноваги в системах Ge-Zn, Ge-Cd, Ge-Hg, Ge-Sb, їх величини для випадку легування Zn і Sb складають $T_3=1000 - 1050^{\circ}\text{C}$, $T_{\phi}=810 - 820^{\circ}\text{C}$.

					ЗБР.171.051.007 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зонний нагрівач прогріває кристалізуючий матеріал до температури плавлення тільки на вузькому участку зливка напівпровідника (≈ 5 мм); при переміщенні нагрівача розплавлений участок також переміщується. Всередині нагрівачів розміщується несуча кварцева труба, внутрішня порожнина якої являється робочим простором, де розміщується ампула з кристалізуючим матеріалом. Вихідний матеріал – германій марки ГПЗ–1 розміщується в графітизованій кварцевій ампулі разом з відповідними наважками легуючих домішок. Після цього ампулу відкачують і запаюють. Попередньо ампули, германій і наважки домішок відповідно піддають хімічно-термічній обробці. Для рівномірного введення легуючих домішок в германій швидкість проходження розплавленої зони по зливку повинна знаходитися в діапазоні 0,6 - 1 см/рік.

Відповідно до ТЗ були розраховані і підібрані технологічні режими для проведення багатокomпонентного легування германію і вирощено ряд зливків термочутливого матеріалу. В результаті одержано зливки з різними концентраціями основної (Zn) і компенсуючої (Sb) домішок в границях від $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ до 10^{18} см^{-3} , з оптимальними співвідношеннями між ними.

2.2 Дослідження термометричних характеристик термочутливих матеріалів

При проведенні вимірювання температурної залежності електричного опору зразків вирощених термочутливих матеріалів досліджувались зразки легованого германію з різними величинами основної домішки цинку (ртуті) і компенсуючої домішки сурми. Вимірювання опору зразків проводились на потенціометричній (градувальній) установці в широкому інтервалі температур від 1,5 К до 373 К. Температурний режим вимірювання забезпечувався за допомогою рідких гелію, азоту в спеціальних кріостатах, принципіальну схему вимірювання зображено на рис. 2.1.

					ЗБР.171.051.007 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

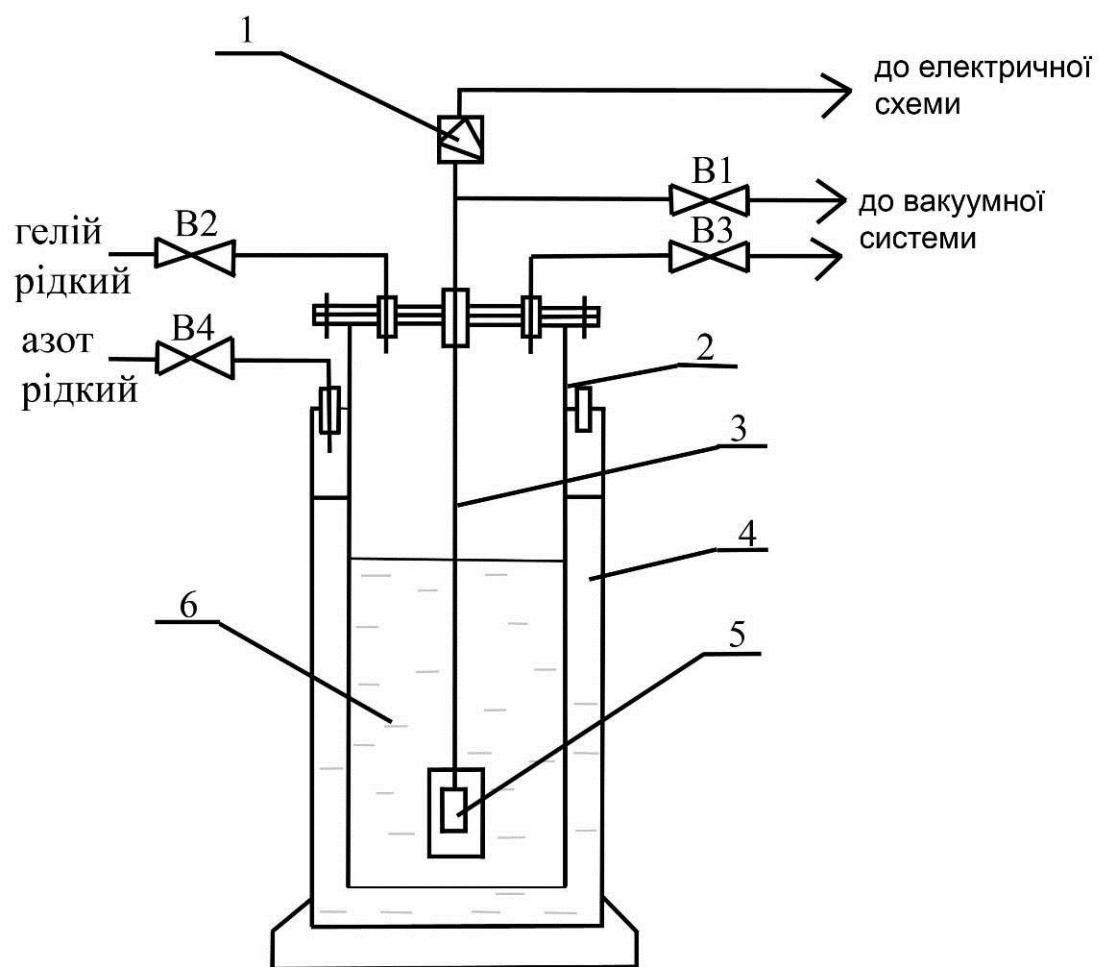


Рис.2.1. Структурна схема установки для градування терморезисторів

Провідність сильно легованого і сильно компенсованого германію істотно відрізняється від провідності класичних слабо легованих і слабо компенсованих напівпровідників. Причина цього в тому, що в сильно легованому і сильно компенсованому напівпровідникові залишаючись в зоні провідності електрони збираються в металічні каплі, відокремлені один від одного мало проникаючими бар'єрами. Тому в такому широкому температурному інтервалі електричний опір вирощених зразків змінюється з температурою в залежності від поступової зміни фізичних механізмів провідності при пониженні температури: зоно-зонний, домішковий і стрибковий механізми. Переходи від одного механізму провідності до другого сильно залежать від величини концентрації основної домішки і концентрації компенсуючої домішки і можуть зміщуватися в бік високих температур. І тому можна керувати величинами опору напівпровідника. Типові залежності опору від температури мають плавний неперервний характер, з пониженням температури опір підвищується (рис. 2.2. та рис. 2.3). Для зразків матеріалу з підвищеною концентрацією основної домішки ($10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$) і помірною компенсацією (0,4 – 0,6) величина термочутливості (dR/dT) при температурі рідкого гелію (4,2 К) знаходиться в межах (2 - 8) % R на 1 % T . Для зразків з концентрацією основної домішки ($10^{16} - 10^{17} \text{ см}^{-3}$) і величиною компенсації (0,7 – 0,8) при температурі рідкого азоту (78 К) термочутливість складає 10 – 20 % R на 1 % T . Величини питомого опору таких зразків в цих реперних температурних точках можуть складати від сотень Ом до десятків кОм. Дані температурної залежності показують, що термочутливий матеріал на основі германію, легованого основною акцепторною домішкою (цинк) і компенсуючою домішкою (сурма) може бути придатним для створення термометрів, вимірювання кріогенних температур як в широкому інтервалі, так і в вузьких, завчасно заданих, діапазонах температур.

					ЗБР.171.051.007 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

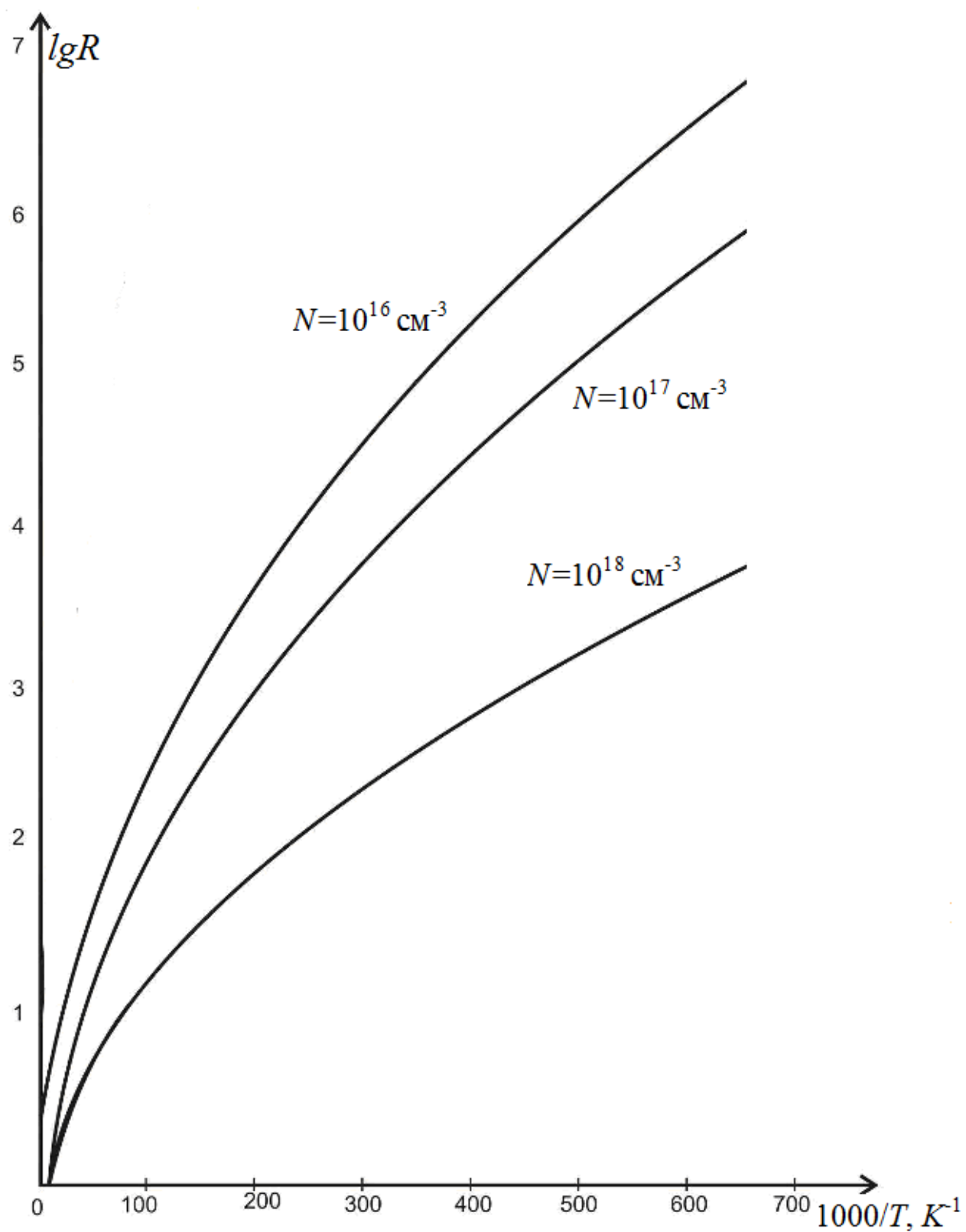


Рис.2.2. Типові температурні залежності опору в гелієво-водневому діапазоні

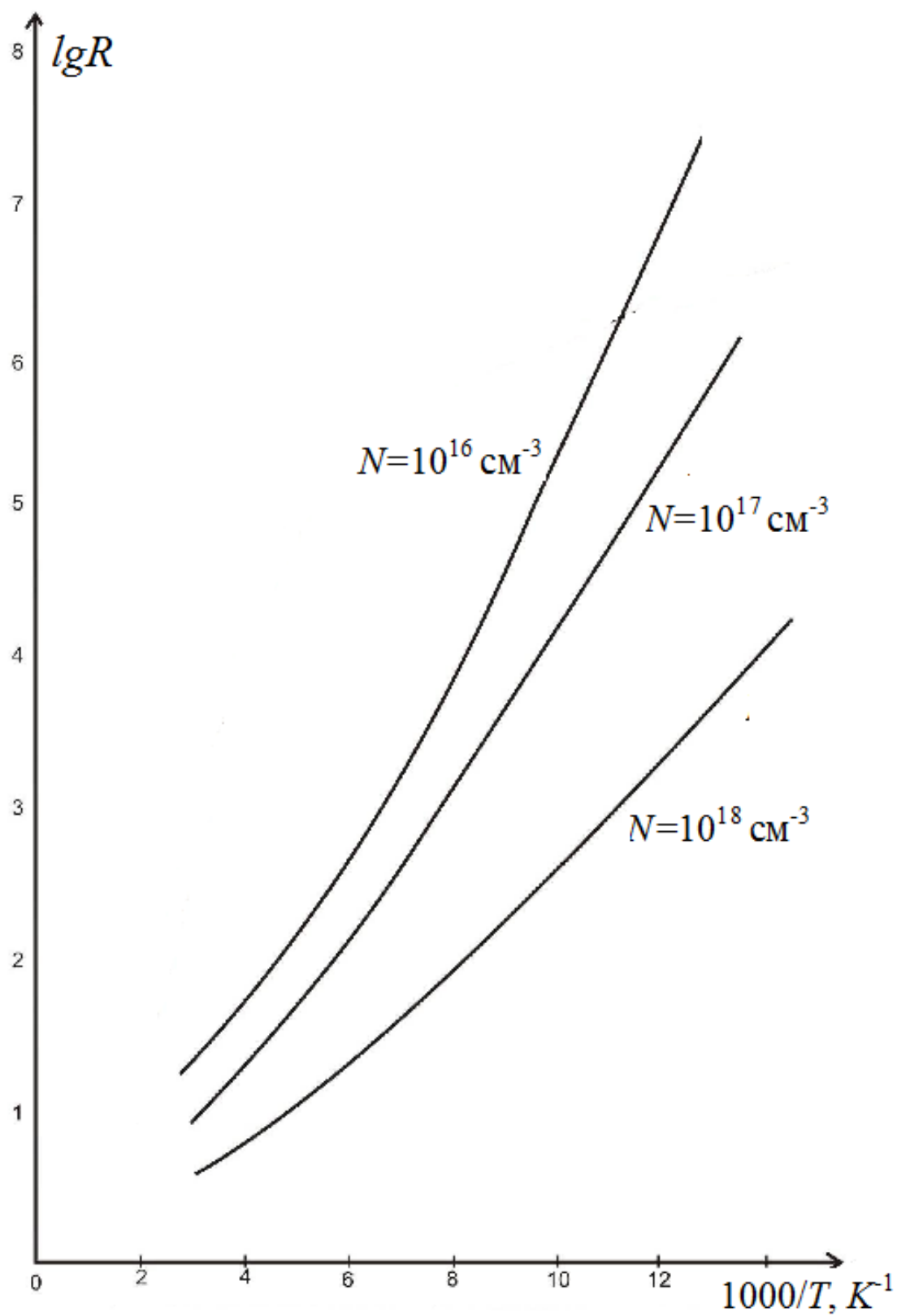


Рис.2.3. Типові температурні залежності опору в азотно-кімнатному діапазоні

Були також досліджені впливи радіаційного опромінення на характеристики зразків з поглиненою дозою до (2 М рад.) і вплив магнітного поля (до 5 Т). Ці впливи є мінімальними. На рис.2.4 показано графіки залежності опору термочутливого матеріалу від величини напруженості магнітного поля при температурі рідкого гелію (4,2 К) і відповідно можливої помилки в вимірюванні температури. Опір спочатку зменшується з ростом магнітного поля, тобто проявляється ефект від'ємного магнітного опору, а при $H \sim 5 \text{ Т}$ спостерігається перехід до додатнього магнітоопору. Магнітоопір невеликий і величина його також не залежить в даному випадку від орієнтації зразка відносно напрямку магнітного поля. Відповідна можлива помилка в вимірюванні температури при 4,2 К до 6 Т не перевищує $\sim 0,01 \text{ К}$, що набагато менше (на 2 порядки), ніж у других типів кріогенних термометрів.

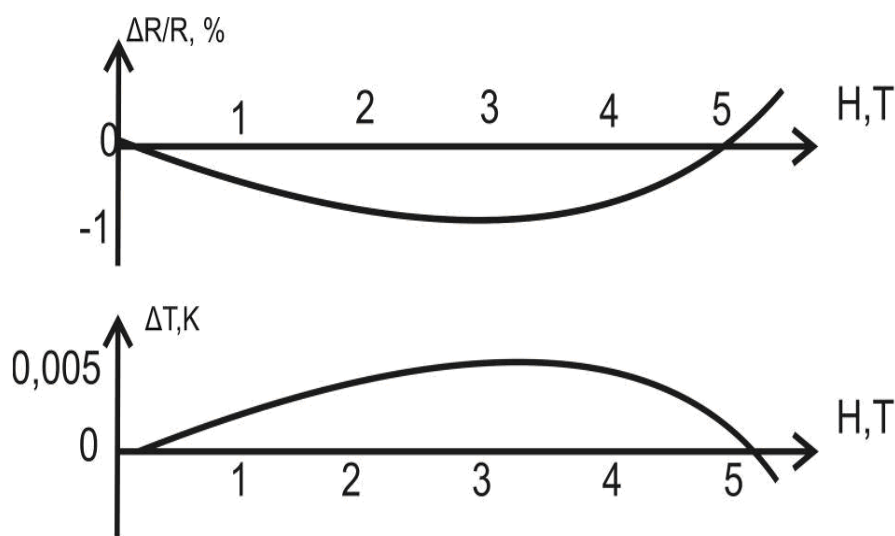


Рис.2.4. Залежність зміни опору в магнітному полі і відповідно похибка по температурі для типового зразка германія при $T = 4,2 \text{ К}$

2.3. Технічні вимоги по розробці напівпровідникових кріогенних термометрів (термоперетворювачів)

На основі аналізу досліджень термометричних характеристик розроблених і вирощених термочутливих напівпровідникових матеріалів було розроблено ескізний проект на напівпровідникові кріогенні термоперетворювачі.

2.3.1. Основні технічні характеристики на термоперетворювачі

- Діапазони робочих температур: 1,8 - 200 К, 10 - 30 К, 60 - 100 К;
- Допустима межа абсолютної похибки від вимірюваної температури $\pm 1\%$;
- Робочий струм термоперетворювачів в залежності від їх опору:
1 мкА...1мА;
- Опір на нижній границі кожного діапазону – до 150 кОм;
- Показник теплової інерції – не більше 2 с;
- Допустима потужність розсіювання – не більше 10^{-6} Вт;
- Електричний опір ізоляції між корпусом і термочутливим елементом - не менше 10^7 Ом;
- Найбільша додаткова зміна похибки термоперетворювачів від впливу магнітних полів до 6 Тл при 4,2 К не повинна перевищувати $\pm 200\%$ від межі допустимої величини абсолютної похибки.

2.3.2. Опис вибраних конструкцій термоперетворювачів

З метою перевірки принципів роботи термоперетворювачів та уточнення вимог, встановлених технічним завданням запропоновані три варіанти конструкцій термоперетворювачів з гальванічною розв'язкою чутливого елемента від вимірюваного об'єкту.

					ЗБР.171.051.007 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Основою конструктивних рішень термоперетворювачів є термочутливі напівпровідникові елементи, які створені на базі германію з багатокомпонентним легуванням.

Існує технологія виготовлення термочутливих елементів для заданих діапазонів температур, в яких вони забезпечують відповідні електричні параметри термоперетворювачів (електроопір, термочутливість). Термочутливі елементи для термоперетворювачів вибрані в формі кубика, розмірами від $0,6 \times 0,6 \times 0,6 \text{ мм}^3$ до $1,0 \times 1,0 \times 1,0 \text{ мм}^3$, що являється оптимальним технологічно і для подальшої роботи з ними. Контактний сплав, на основі індію, який забезпечує омичність контакту з напівпровідником, вплавляється з протилежних сторін кубика в атмосфері водню при температурах $500 - 550^\circ \text{C}$. До створених контактних площ можна вже припаювати різні дрітці випуски. Також створені контактні площі дозволяють припаяти чутливий елемент до різних металевих поверхонь і таким чином розміщувати в різних капсулах, що дає змогу створювати конструкцію термоперетворювача для роботи під час сильних механічних впливів.

Перший варіант конструкції складається з чутливого елементу 1 (розмірами $0,9 \times 0,9 \times 0,9 \text{ мм}^3$), розташованого на поверхні діелектричної пластини з металізованого сапфіру 3 та замкнутого в корпус, що складається з основи 4 та корпусу 2. Випуски чутливого елементу фіксуються герметиком 10, розташованим у верхній частині обичайки. Зовнішні розміри корпусу: діаметр – 3,2 мм, довжина – 5 мм. Діелектрична пластини з металізованого сапфіру має високу теплопровідність при низьких температурах і тому забезпечує надійний тепловий контакт термоперетворювача з об'єктом.

					ЗБР.171.051.007 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Другий варіант конструкції складається з чутливого елементу 1 (розмірами $0,9 \times 0,9 \times 0,9 \text{ мм}^3$), припаяного до дна внутрішнього мідного циліндру 3 та замкнутого в зовнішній циліндр 2. Теплопровідним герметиком 10 фіксуються випуски чутливого елементу і заповнюється порожнина між внутрішнім та зовнішнім циліндрами. Зовнішні розміри: діаметр – 5 мм, довжина – 9 мм. Дана конструкція дозволяє використовувати термоперетворювачі при підвищеному тиску та підвищених механічних навантаженнях.

Третій варіант конструкції термоперетворювача складається з чутливого елементу 1 (розмірами $0,9 \times 0,9 \times 0,9 \text{ мм}^3$), розташованого в корпусі 2, виготовлений з нейзильберової трубки. Випуски чутливого елементу 5 фіксуються герметиком 8. Зовнішні розміри: діаметр – 2 мм, довжина – 7 мм.

Дана конструкція дозволяє вимірювати температуру для вирішення задач, де необхідно мати малі розміри термоперетворювачів при розведенні випусків в різні сторони; в основному термоперетворювачі можуть використовуватися для вимірювання в кріорідинах і в їх газовому середовищі.

Розроблені основні технологічні процеси виготовлення макетних зразків термоперетворювачів запропонованих конструкцій, на яких були проведені лабораторні випробування. Під розроблені конструкції термоперетворювачів розроблені різноманітні пристрої для їх градуювання. Основою градуювання термоперетворювачів є визначення залежності їх опору від температури. Нанесення температурної шкали на досліджувані зразки термоперетворювачів виконується на установці градуювання, при цьому використовуються зразкові термометри: ТСГ в діапазоні 1,5 - 30 К та ТСПН в діапазоні 30 - 200 К. Вимірювання опору запропонованих термоперетворювачів та зразкових

					ЗБР.171.051.007 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

термометрів здійснюється непрямим методом, шляхом вимірювання спаду напруги при проходженні через них струму.

Необхідні температурні поля і точки отримуються з допомогою рідких гелію і азоту. Функціональна залежність опору термоперетворювача від температури $R = f(T)$ апроксимується на електронній обчислювальній машині за допомогою полінома третього ступеня по шести точках:

$$F(x) = \sum_{i=1}^S a_n x_i^n,$$

де a_n - коефіцієнт полінома; x_i - температура; S - 3; n - 6.

Результати машинної обробки представлені у вигляді градуювальної таблиці, в якій надається наступна інформація: T , К – температура; R , Ом – опір; dR/dT – перша похідна опору по температурі; lgR – логарифм величини опору; $10^3/T$ – величина, обернена температурі.

2.3.3. Лабораторні випробування термоперетворювачів

Термометрична характеристика типового термоперетворювача для діапазону 60...100 К показана на рис. 2.5. Як видно, термоперетворювач має високу термочутливість, dR/dT при температурі рідкого азоту 77,4 К складає ≈ 1000 Ом на 1 К (або $\approx 12\%$ R на 1% T), на границях діапазону 60 К; 100 К – відповідно ≈ 27000 Ом на 1 К ($\approx 13\%$ R на 1% T) і ≈ 40 Ом на 1 К ($\approx 9\%$ R на 1% T). Опори на границях діапазону складають – на нижній границі в межах 100...150 кОм, на верхній – в межах 350...450 Ом. Такі величини опорів зручні для роботи з стандартними серійними вимірювальними приладами.

					ЗБР.171.051.007 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Типова термометрична характеристика термоперетворювача для діапазону 1,8 - 200 К показана на рис.2.6. Термочутливість dR/dT при температурі рідкого гелію 4,2 К складає ≈ 2000 Ом на 1 К (або 4,5% R на 1% T); при 1,8 К складає ≈ 400000 Ом на 1 К ($\approx 6\%$ R на 1% T).

Термометрична характеристика термоперетворювача для діапазону 10...30К представлена на рис.2.7. Термочутливість при температурі рідкого водню 20,4 К складає ≈ 2500 Ом на 1 К ($\approx 3\%$ R на 1% T).

Термочутливості розроблених термоперетворювачів є набагато більші від термочутливості платинових і германієвих термометрів фірми Lake Shore, які використовуються для цих діапазонів.

По розробленим методикам були проведені лабораторні випробування розроблених всіх типів термоперетворювачів, де основною метою було – виявлення відповідності основних характеристик вимогам технічного завдання. Випробування і вимірювання показали, що термоперетворювачі зберігають свої параметри після впливу на них синусоїдальної вібрації в діапазоні частот 5...120 Гц з прискоренням до 20 м/с²; після впливу на них підвищеної температури навколишнього середовища до 393 К протягом 2 годин. Підтверджено, що розроблені термоперетворювачі мають електричний опір ізоляції між термочутливим елементом і корпусом (тобто від вимірюваного об'єкту) складає більше 10 МОм. Також підтверджено, що всі термоперетворювачі мають на нижній границі своїх діапазонів від 60 до 150 кОм.

					ЗБР.171.051.007 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

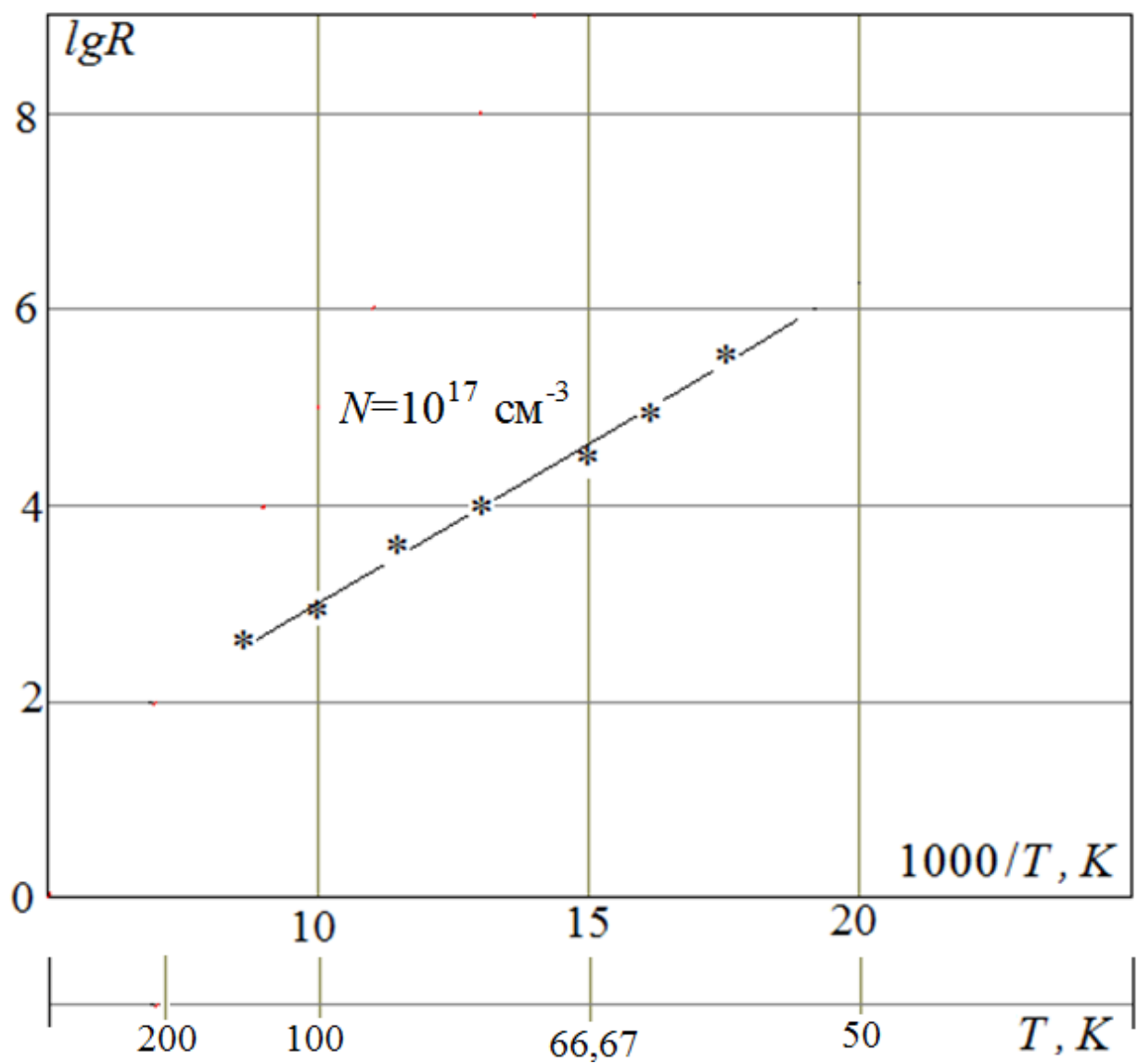


Рис.2.5. Типова термометрична характеристика експериментального зразка термометра для діапазону 60...100 К. Термочутливість $dR/dT=1000 \text{ Ом}^0/\text{К}$ при температурі рідкого азоту 77,4 К

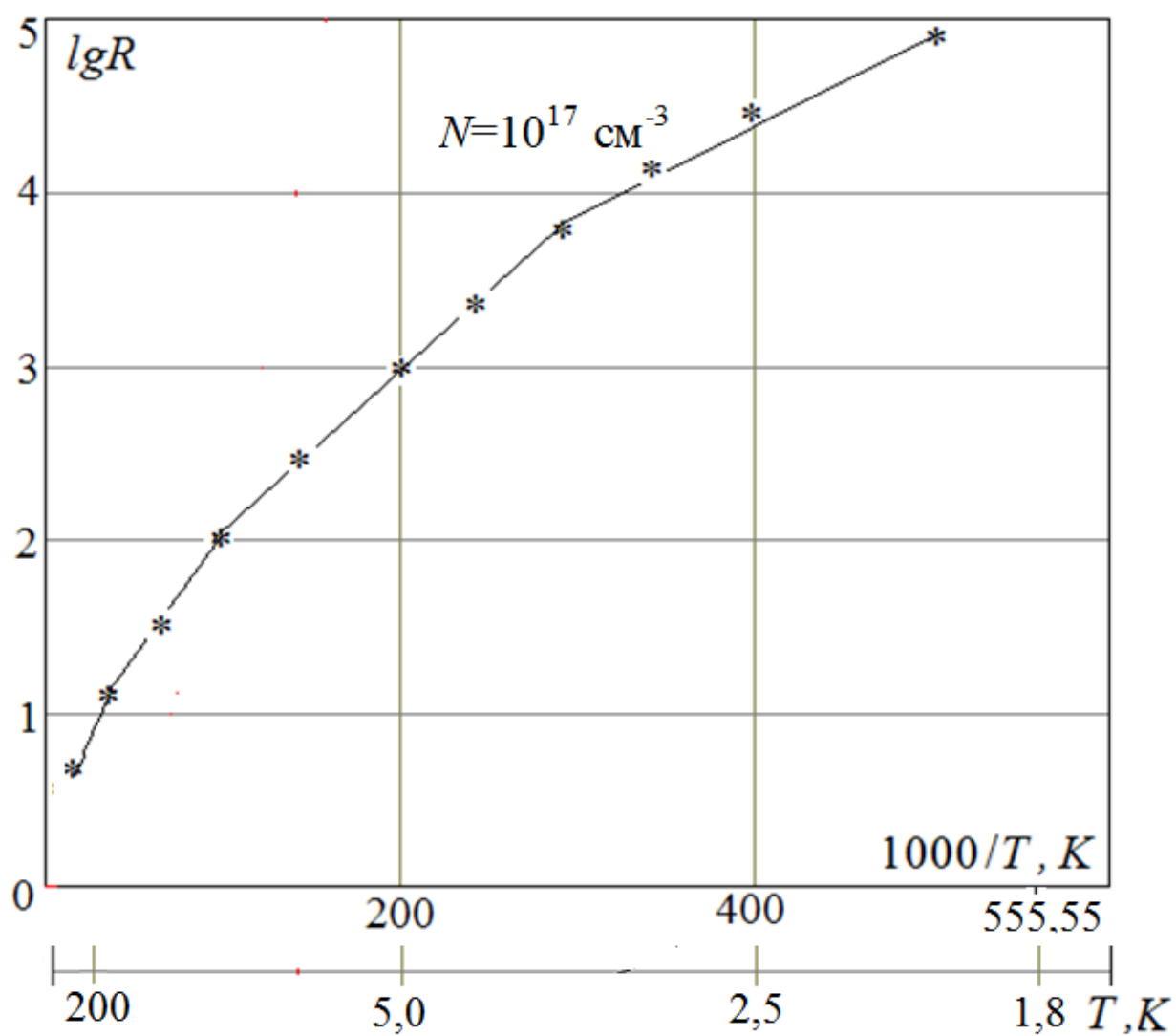


Рис. 2.6. Типова термометрична характеристика експериментального зразка термометра для діапазону 1,8...200 К. Термочутливість $dR/dT=2000 \text{ Ом}^0/\text{К}$ при температурі рідкого гелію 4,2 К

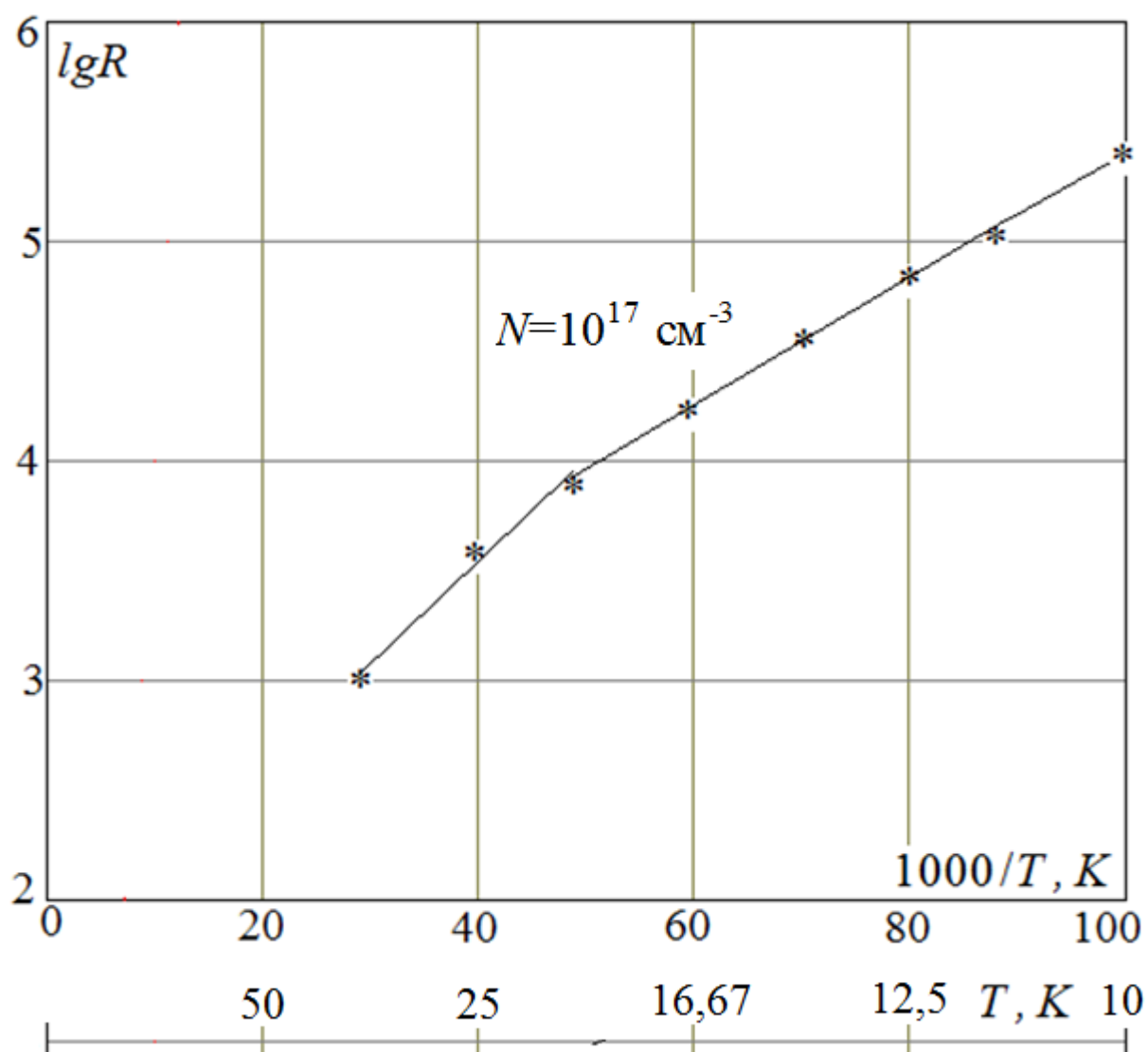


Рис. 2.7. Типова термометрична характеристика експериментального зразка термометра для діапазону 10...30 К. Термочутливість $dR/dT=2500 \text{ Ом/}^0\text{К}$ при температурі рідкого водню 20,4 К

2.3.4. Розрахунки для підтвердження роботоздатності

і надійності конструкцій

Прогнозування показників надійності термоперетворювачів в процесі проектування проводиться з метою визначення приблизних значень показників надійності розроблених варіантів термоперетворювачів і порівняння прогнозованих показників надійності з потрібними. Результатами прогнозування надійності є наближені кількісні оцінки надійності проєктованих термоперетворювачів. На стадії розробки ескізного проєкту проводиться орієнтоване прогнозування показників надійності термоперетворювачів з використанням дослідно-статистичного методу прогнозування по термоперетворювачам – аналогам. Вихідною інформацією для орієнтованого прогнозування показників надійності термоперетворювачів є: рисунки проєктованих термоперетворювачів; банк даних про термоперетворювачі, що містить в собі статистичні дані і результати випробувань їх на надійність. Враховуючи, що показники довговічності для невідновлюваних виробів збігаються з показниками безвідмовності, орієнтовано прогнозується показник безвідмовності. Для прогнозування показників надійності, термоперетворювач треба розглядати як систему, яка має два типи вузлів: електричні і механічні. В процесі експлуатації електричні і механічні вузли термоперетворювача зазнають різних специфічних впливів. Ці впливи залежать від великої кількості факторів і можуть впливати на фізичні та механічні властивості і метрологічні характеристики, тобто і на надійність термоперетворювачів в цілому. В вузлах електричного кола термоперетворювача, в процесі експлуатації можуть бути механічні порушення (обрив електричного кола) і зміна електричних характеристик (старіння матеріалів, пробій діелектриків), що приводить до змін

					ЗБР.171.051.007 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

основних метрологічних характеристик термоперетворювача. Згідно інформації, яка є в літературі по надійності і одержаної з нормативно-технічної документації по розрахунку показників надійності термопар і термометрів опору, приймаємо, що наробка до раптової відмови (механічні пошкодження) термоперетворювачів підлягає експоненціальному закону розподілу, наробка до поступового (параметричного) відказу – нормальному. Імовірність безвідмовної роботи термоперетворювачів, як системи, може бути виражена формулою:

$$P(t) = P_1(t)P_2(t) \quad (2.1)$$

де $P_1(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи термоперетворювачів відносно раптової відмови; $P_2(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи термоперетворювачів відносно поступової відмови.

Розрахунок показника $P_1(t)$ проводиться згідно формули:

$$P_1(t) = \exp\left(-\sum_{i=1}^m n_i \lambda_i t\right), \quad (2.2)$$

де m – кількість кожного елементу в термоперетворювачі; λ_i – інтенсивність відмов окремих елементів термоперетворювачів; t – час безвідмовної роботи термоперетворювачів ($t=1000$ годин).

Для розрахунку орієнтованого прогнозування $P_1(t)$ для проектного термоперетворювача використовується значення інтенсивності відмов окремих елементів, одержаних в результаті випробувань на надійність різних термоперетворювачів – аналогів (таблиця 2.1).

Ймовірність того, що вихідний параметр (основна похибка) буде знаходитись в допустимих межах, приймаючи нормальний закон розподілу значень вихідного параметру, може бути визначена за формулою:

					ЗБР.171.051.007 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$P_2(t) = 2\Phi\left(\frac{\Delta}{\sigma}\right) \quad (2.3)$$

де $2\Phi\left(\frac{\Delta}{\sigma}\right)$ - нормальна функція Лапласа (подвоєні значення); Δ - межа допустимої похибки термоперетворювача; σ - середнє квадратичне відхилення похибки.

Значення $P_2(t)$, одержане в процесі випробувань на надійність термоперетворювачів – аналогів, знаходяться в межах 0,98...0,99.

Таблиця 2.1

Інтенсивність відмов окремих елементів перетворювача

Назва елементів	Позначення	Значення $\lambda \cdot 10^{-5}, \text{г}^{-1}$
Термочутливий елемент	$\lambda_{\text{те}}$	0,03
Корпус	$\lambda_{\text{об}}$	0,03
Основа	$\lambda_{\text{осн}}$	0,03
Прокладка з лакотканини	$\lambda_{\text{пл}}$	0,05
Прокладка фторопластова	$\lambda_{\text{пф}}$	0,05
Випуск (МГТФ)	$\lambda_{\text{в}}$	0,03
Випуск з мідної лудженої проволони	$\lambda_{\text{ву}}$	0,03
Пластина діелектрична	$\lambda_{\text{пд}}$	0,07
Клейове ущільнення (герм етик)	$\lambda_{\text{ку}}$	0,61
Клейове з'єднання	$\lambda_{\text{кз}}$	0,21
Паяне з'єднання	$\lambda_{\text{пз}}$	0,87
Циліндр зовнішній	$\lambda_{\text{цз}}$	0,03
Циліндр внутрішній	$\lambda_{\text{цв}}$	0,03

Термоперетворювач, зображений на додатку 1, складається з десяти деталей, шести паяних і двох клейових з'єднань. Згідно з даними,

					ЗБР.171.051.007 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

приведеними в таблиці 2.1, ймовірність безвідмовної роботи по раптовим відмовам:

$$P_1(t) = \exp \left[- \left(\lambda_{te} + \lambda_{об} + \lambda_{очн} + \lambda_{нл} + \lambda_{но} + 2\lambda_{г} + 2\lambda_{гв} + \lambda_{но} + \lambda_{кв} + \lambda_{кз} + 6\lambda_{нз} \right) t \right] \quad (2.4)$$

$$P_1(t) = \exp \left[- \left(0.03 + 0.03 + 0.03 + 0.05 + 2 \cdot 0.03 + 2 \cdot 0.03 + 0.07 + 0.61 + 0.21 + 6 \cdot 0.87 \right) \cdot 10^{-5} \cdot 1000 \right] = \\ = \exp \left(- 6.42 \cdot 10^{-5} \cdot 1000 \right) = 0.94$$

Орієнтована ймовірність безвідмовної роботи термоперетворювача (як системи):

$$P(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) = 0.94 \cdot 0.98 = 0.92 \quad (2.5)$$

Термоперетворювач, зображений на додатку 2, складається з шести деталей, чотирьох паяних з'єднань і одного клейового, згідно з даними, приведеними в таблиці 2.1, ймовірність безвідмовної роботи по раптовим відмовам:

$$P_1(t) = \exp \left[- \left(\lambda_{те} + \lambda_{цз} + \lambda_{цв} + \lambda_{нл} + \lambda_{гв} + 2\lambda_{г} + \lambda_{кв} + 4\lambda_{нз} \right) \cdot t \right] \quad (2.6)$$

$$P_1(t) = \exp \left[- \left(0.03 + 0.03 + 0.03 + 0.05 + 0.03 + 2 \cdot 0.03 + 0.61 + 4 \cdot 0.87 \right) \cdot 10^{-5} \cdot 1000 \right] = 0.96$$

Орієнтована ймовірність безвідмовної роботи термоперетворювача (як системи):

$$P(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) = 0.96 \cdot 0.96 = 0.94 \quad (2.7)$$

Термоперетворювач, зображений на додатку 3, складається з дев'яти деталей, чотирьох паяних з'єднань і двох клейових з'єднань. Згідно з даними, приведеними в таблиці 2.1, ймовірність безвідмовної роботи по раптовим відмовам:

$$P_1(t) = \exp \left[- \left(\lambda_{те} + \lambda_{об} + 2\lambda_{нл} + \lambda_{нф} + 2\lambda_{гв} + 2\lambda_{г} + 2\lambda_{кв} + 4\lambda_{нз} \right) \cdot t \right] \quad (2.8)$$

$$P_1(t) = \exp \left[- \left(0.03 + 0.03 + 2 \cdot 0.05 + 0.05 + 2 \cdot 0.03 + 2 \cdot 0.03 + 2 \cdot 0.61 + 4 \cdot 0.87 \right) \cdot 10^{-5} \cdot 1000 \right] = 0.94$$

					ЗБР.171.051.007 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Орієнтована імовірність безвідмовної роботи термоперетворювача (як системи):

$$P(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) = 0.94 \cdot 0.98 = 0.92 \quad (2.9)$$

Достовірність кінцевих результатів прогнозування надійності розроблюваних термоперетворювачів буде підтверджуватись в процесі визначальних випробувань на надійність.

На стадії виконання технічного проекту необхідно розробляти програму і методику проведення попередніх (заводських) випробувань дослідних зразків термоперетворювачів. В програмі відображати методи проведення випробувань, місце та стенди випробувань, які будуть проведені в наступній стадії виконання ДКР – робочого проектування, для підтвердження основних пунктів ТЗ. Також на стадії технічного проекту розробляються технологічні процеси виготовлення дослідних зразків термоперетворювачів: вирощені та підготовлені відповідні термочутливі матеріали для виготовлення партій цих дослідних зразків, на яких будуть проведені попередні випробування.

					ЗБР.171.051.007 ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В и с н о в к и

1. Вирощені напівпровідникові термочутливі матеріали на базі германію з багатокомпонентним легуванням різними домішками (Zn, Hg, Sb), які забезпечують створення термоперетворювачів для діапазонів: 1,8...200 К, 10...30 К, 60...100 К.

2. Розроблено три варіанти конструкцій термоперетворювачів для кожного із заданих діапазонів температур.

3. Проведено лабораторні випробування макетних зразків, які підтверджують основні вимоги ТЗ на термоперетворювачі:

- Термочутливість термоперетворювача dR/dT для діапазону 60...100 К при температурі рідкого азоту 77,4 К складає близько 1000 Ом на 1 К (або $\approx 12\% R$ на $1\% T$); на границях діапазону 60 К та 100 К – відповідно близько 27000 Ом на 1 К ($\approx 13\% R$ на $1\% T$) і близько 40 Ом на 1 К ($\approx 9\% R$ на $1\% T$). Опори на границях діапазону складають – на нижній границі в межах 100...150 кОм, на верхній – в межах 350...450 Ом. Такі величини опорів зручні для роботи з стандартними серійними вимірювальними приладами.

- Термочутливість термоперетворювача dR/dT для діапазону 1,8 - 200 К при температурі рідкого гелію 4,2 К складає близько 2000 Ом на 1 К (або $4,5\% R$ на $1\% T$); при 1,8 К складає близько 400000 Ом на 1 К ($\approx 6\% R$ на $1\% T$).

- Термочутливість термоперетворювача dR/dT для діапазону 10...30 К при температурі рідкого водню 20,4 К складає близько 2500 Ом на 1 К ($\approx 3\% R$ на $1\% T$).

4. Проведено аналіз умов праці в приміщенні, досліджено повітряне середовище приміщення, освітлення, проведена оцінка електробезпечності і пожежної безпеки та виконано розрахунок захисного заземлення.

					ЗБР.171.051.007 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

ВИСНОВКИ

1. Огляд науково-технічної літератури показав, що в теперішній час зростає застосування низьких температур в ядерній фізиці та фізиці високих енергій, радіо-і НВЧ-техніці та медицині. Тому великого значення набувають чутливі вимірювальні прилади та інша апаратура з надпровідними елементами. Невід'ємною частиною техніки низьких температур є їх вимірювання.

Одночасно з розвитком низькотемпературної техніки та її застосуванням більшу роль набуває й техніка вимірювання низьких температур у межах приблизно від 1 до 273 К (від -272 до 0°C). Термометри для цих вимірів, як правило, засновані на температурній залежності обраних фізичних властивостей відповідних речовин. Такими властивостями можуть бути, наприклад, тиск газу, тиск парів у рівновазі з рідиною, об'єм рідини, електричний опір, термоелектрорушійна сила, магнітна проникність, швидкість звуку в газі й т.п.

При виборі термометра необхідно брати до уваги залежність термометричного параметра термометра (наприклад, опору, напруги й т.п.) від температури, теплоємності термометра (від якої залежить його постійна часу), нагрівання термометра за рахунок джоулівського тепла, чутливість до магнітного поля й геометричні розміри. Звичайно не можна не враховувати й складність термометра або методу, трудомісткість обслуговування, вартість і т.п. Зваживши, таким чином, переваги й недоліки можливих способів вимірювання низьких температур, можна дійти висновку, що в переважній більшості випадків найбільш раціональні електричні термометри й методи.

Електричні термометри, призначені для діапазону низьких температур, можна розділити на резистивні (термометри опору), ємнісні, індуктивні й

					ЗБР.171.051.007 ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

термоелектричні. Із всіх відомих типів найбільше поширення одержали резистивні термометри й термоелектричні (термопари).

В свою чергу з термометрів опору найчастіше застосовуються платинові (зручні для низьких температур від 1 К до 273 К), вугільні (від 0,02 до 100 К), термисторні (від 4 до 273 К), германієві (від 0,05 до 100 К), кремнієві (від 1 до 400 К) і з арсеніду галію (від 1 до 273 К). Серед термоелектричних у першу чергу потрібно зазначити термопари мідь/константан (від 10 до 273 К) і золото - залізо/хромель (від 1 до 273 К).

2. Вирощені напівпровідникові термочутливі матеріали на базі германію з багатокомпонентним легуванням різними домішками (Zn, Hg, Sb), які забезпечують створення термоперетворювачів для діапазонів 1,8...200 К, 10...30 К, 60...100 К.

3. Розроблено три варіанти конструкцій термоперетворювачів для кожного із заданих діапазонів температур.

4. Проведено лабораторні випробування макетних зразків, які підтверджують основні вимоги ТЗ на термоперетворювачі.

Термочутливість термоперетворювача dR/dT для діапазону 60...100 К при температурі рідкого азоту 77,4 К складає близько 1000 Ом на 1 К (або $\approx 12\% R$ на $1\% T$); на границях діапазону 60 К та 100 К – відповідно близько 27000 Ом на 1 К ($\approx 13\% R$ на $1\% T$) і близько 40 Ом на 1 К ($\approx 9\% R$ на $1\% T$). Опори на границях діапазону складають – на нижній границі в межах 100...150 кОм, на верхній – в межах 350...450 Ом. Такі величини опорів зручні для роботи з стандартними серійними вимірювальними приладами.

Термочутливість термоперетворювача dR/dT для діапазону 1,8 - 200 К при температурі рідкого гелію 4,2 К складає близько 2000 Ом на 1 К (або

					ЗБР.171.051.007 ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4,5% R на 1% T); при 1,8 К складає близько 400000 Ом на 1 К ($\approx 6\%$ R на 1% T).

Термочутливість термоперетворювача dR/dT для діапазону 10...30 К при температурі рідкого водню 20,4 К складає близько 2500 Ом на 1 К ($\approx 3\%$ R на 1% T).

Термочутливості досліджених термоперетворювачів є набагато більші від платинових і германієвих термометрів фірми Lake Shore, які використовуються для цих діапазонів.

Випробування і вимірювання показали, що термоперетворювачі зберігають свої параметри після впливу на них синусоїдальної вібрації в діапазоні частот 5...120 Гц з прискоренням до 20 м/с²; після впливу на них підвищеної температури навколишнього середовища до 393 К протягом 2 годин.

Розроблені мікроелектронні датчики температури на терморезисторах можуть служити базою для розробки багатоканальних систем вимірювання кріогенних температур.

					ЗБР.171.051.007 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Дорожовець М., Мотало В., Стадник Б., Василюк В., Борек Р., Ковальчик А. Основи метрології та вимірювальної техніки. Том 1. Основи метрології. За ред. Стадника Б. –Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка». 2005. – 530 с.
2. Дорожовець М., Мотало В., Стадник Б., Василюк В., Борек Р., Ковальчик А. Основи метрології та вимірювальної техніки. Том 2. Вимірювальна техніка. За ред. Стадника Б. –Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка». 2005. – 655 с.
3. Вуйцік В., Готра З.Ю., Григор'єв В.В., Каліта В., Мельник О.М., Потенцкі Є. Мікроелектронні сенсори фізичних величин. За ред. Готри З.Ю. Том 1. –Львів: Ліга-Прес. 2003. – 473 с.
4. Вуйцік В., Готра З.Ю., Готра О.З., Григор'єв В.В., Каліта В., Мельник О.М., Потенцкі Є. Мікроелектронні сенсори фізичних величин. За ред. Готри З.Ю. Том 2. - Львів: Ліга-Прес. 2003. – 595 с.
5. Готра О.З. Мікроелектронні елементи та пристрої для термометрії. -Львів: Ліга-Прес. 2001. - 487 с.
6. Температурные измерения: Справочник / Под ред. О.А. Геращенко. - Киев: Наукова думка. 1989. -704 с.
7. Елементи теорії мікроелектронних сенсорів / Буджак Я., Готра З., Готра О. та інш.; За ред. З.Ю. Готри. - Львів: Ліга-Прес. 2001. - 636 с.
8. Шефтель И.Т. Терморезистори. Параметры, характеристики та області застосування. М.: Наука. 1973. – 320 с.
9. Температурные измерения: Справочник / Под ред. О.А. Геращенко. - Киев: Наукова думка. 1989. -704 с.
10. Федотов Я.А. Основы физики полупроводниковых приборов. М.: Сов.радио. 1969. – 350 с.
11. Вепшек Я. Вимірювання низьких температур електричними методами. М.: Енергія. 1980. -245 с.
12. Кривоносов А.И. Полупроводникові датчики температури. М.: Енергія,

					ЗБР.171.051.007 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

1974. – 189 с.

13. Вікулін І.М. Напівпровідникові датчики. М.: Рад. Радіо. 1975. – 259 с.
14. Пасинков В.В., Чіркін Л.К. Напівпровідникові прилади. Посібник для вузів. М.: Вища школа. 2003. – 325 с.
15. Температурные измерения: Справочник / Под ред. О.А. Геращенко. Киев: Наукова думка. 1989.-704 с.

					ЗБР.171.051.007 ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

